Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Evaluation of The Geometry and Investigating of Changes in Saturated and Unsaturated Volumes of Mashhad - Chenaran Aquifer[*]

Research Article

Hossein Mohammadzadeh[1], Raheleh Shahriari[2], Naser Hafezi Moghaddas[3], Azam Ghazi[4]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.87150.1287

1. Introduction

Alluvial aquifers are among the primary sources of water supply worldwide. Therefore, evaluating the geometry of an aquifer is crucial not only for identifying the thickness of the alluvium, estimating aquifer storage, and predicting extractable groundwater, but also for investigating changes in the geometry and volume (total, saturated, and unsaturated) of the aquifer over time. Such evaluations are necessary to optimize groundwater resource usage and properly manage aquifers.

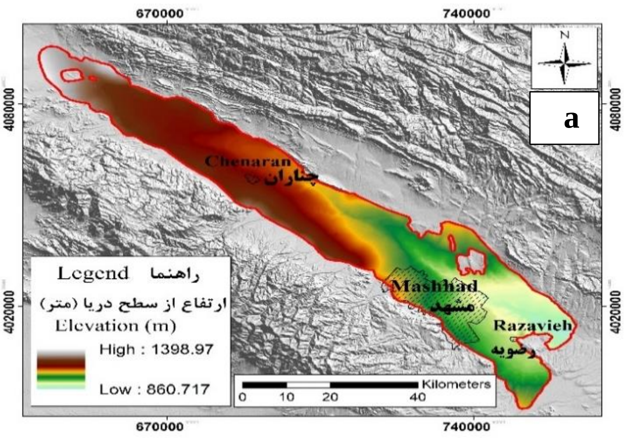
Currently, the rate of water withdrawal from aquifers significantly exceeds the rate of groundwater recharge, causing a sharp decline in groundwater levels, particularly in the Mashhad-Chenaran aquifer (MCA). This article aims to:

1. Evaluate the geometry of the MCA,
2. Estimate the alluvium thickness of the MCA,
3. Investigate changes in the volume of the saturated part of the MCA over a 30-year period, and
4. Identify areas of the MCA that have experienced a significant drop in water levels.

2. Materials and Methods

To determine the geometry of the aquifer, zoning maps of various levels of the MCA aquifer were prepared, including the ground surface digital elevation map (DEM), the bedrock digital elevation map (BDEM), and the water table digital elevation map (WDEM) (Figure 1). Subsequently, to calculate the volume of the MCA aquifer, several zoning maps were created, including the aquifer thickness map (ATM), the saturated thickness map (STM), and the unsaturated thickness map (USTM). Using the total surface area of the MCA (2528 km²), the volumes of different aquifer sections (total, saturated, and unsaturated) were determined.

To assess changes in the MCA volume over time, WDEMs were prepared for the years 1991, 2001, 2011, and 2021, based on water level monitoring data from 74 piezometers across the MCA over a 30-year period (from August 1991 to August 2021). Finally, by subtracting the WDEMs of different years from the BDEM of the aquifer and utilizing raster computing capabilities in a GIS environment, saturated and unsaturated thickness zoning maps were generated for each year.



[*]Manuscript received March 6, 2024, Revised September 16, 2024, Accepted October 6, 2024.

[1] Corresponding author. Professor, Groundwater and Geothermal Research Center (GRC), Water and Environment Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email:** mohammadzadeh@um.ac.ir

[2] Hydrogeologist, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

[3] Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

[4] Engineering Geologist, Zamin Physic Pouya Consulting Company.

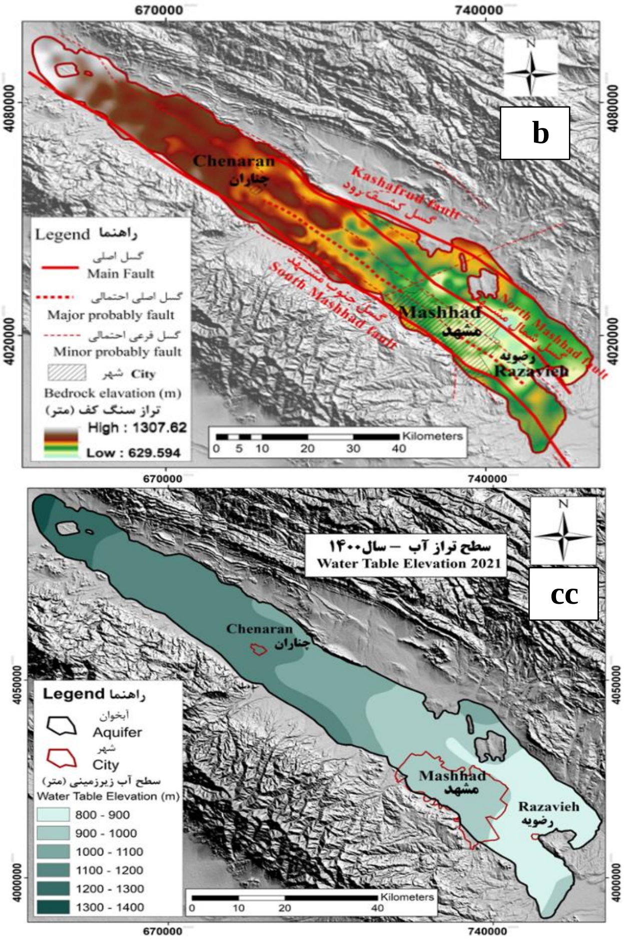


Figure 1 a) Digital Elevation Map (DEM), b) Bedrock Digital Elevation Map (BDEM), and c) Water Table Digital Elevation Map (WDEM) of Mashhad – Chenaran aquifer

3- Results and Discussion

Based on the obtained BDEM, the bedrock morphology was found to be uneven mainly in central part of the Mashhad Plain, between Mashhad and Chenaran. This unevenness is subject to various factors including geology and tectonics events and it can be affected by the north and south fault of Mashhad. So that, the thickness of the alluvium in some places is 300 meters, while in some other places it is near the ground level. The deep part of the MCA is located in the central part of the plain, in the distance between Chenaran and Razavieh (where the city of Mashhad is located). The most of Mashhad's drinking water supply deep wells are located in this area as well. The longitudinal and cross-sections of the aquifer shows that the alluvial MCA is an unconfined aquifer with a single layer, and the groundwater flow from west and northwest to east and southeast direction, which can be confirmed by the prepared water table digital elevation map (WDEM). The prepared maps of changes in saturated and unsaturated thickness of the aquifer (STM and USTM) shows that the thickness of the saturated part of the aquifer has decreased during 1991 to 2021 (Figure 2).

So that, with dropping in the water level, the volume of the saturated part of the aquifer has decreased about 42 billion cubic meters (BCM) over 30 years. The greatest decrease in volume of saturation thickness (about 23 BCM) were made between August 2001 and August 2011, when high number of wells with extensive aquifer exploitation were seen. A comparison of the volume of the saturated part of the aquifer in 2001s and in 2010s shows that during 2011 to 2021, the aquifer was in a better condition than the previous years and it lost less water (about 5 BCM). Although this misleading to the minor positive effect of the previous aquifer balancing projects, but the aquifer may have faced with a decrease in efficiency and withdrawal capacity due to the water table dropping. In other words, it is not possible to the aquifer, which has suffered a continuous and irreversible decline, was able to collect water as before. Also, the examination of the STM shows rising in water level compared to the nearby points in the central part of the aquifer, in the distance between Razavieh and Mashhad, between 2011 and 2021. Although as a result of urban effluents and sewage infiltration to the aquifer and eliminating a number of wells due to the supplied water from beyond MCA catchment area (e.g., from the Doosti Dam), a slight decrease in the rate of water level drop can be seen, however, in general due to the compaction and in turn reduction of specific yield of the aquifer materials, the useful volume and the efficiency of the MCA aquifer was reduced.

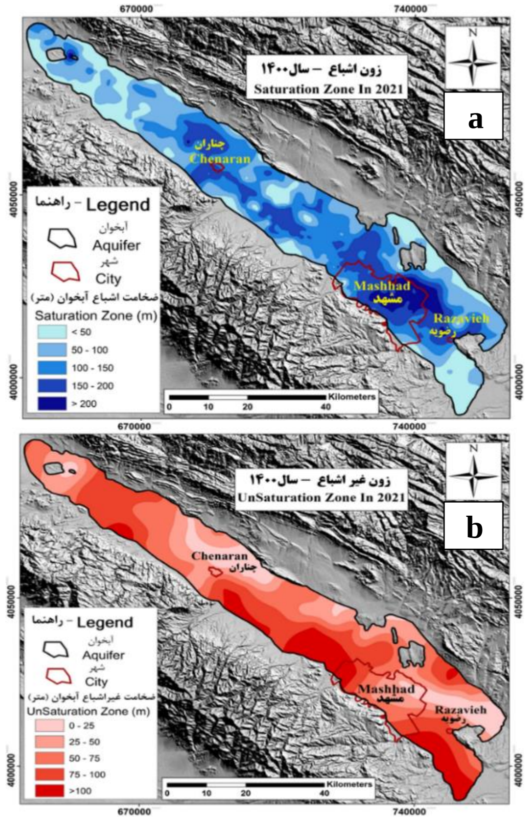


Figure 2 The variation maps of saturated (a) and unsaturated (b) thicknesses (STM and USTM) of Mashhad – Chenaran aquifer

Tabel 1 Changes in thicknesses and volume (total, saturated and unsaturated zones) of Mashhad - Chanaran aquifer during 30 years

	2021	2011	2001	1991
	Unsatutarion Zone			
Thickness (m)	65	62	55	49
Volume (BCM)	165	160	137	123
	Saturation Zone			
Thickness (m)	105	107	116	122
Volume (BCM)	265	270	293	307
	Total Aquifer			
Thickness (m)				172
Volume (BCM)				430

4- Conclusions

The results of this investigations show that the total volume of the MCA is about 430 BCM, and the saturated thickness of the MCA has been decreasing over time (Table 1). The volume of the saturated part of the aquifer was decreased from 307 to 265 BCM (about 42 BCM) over the past 30 years (from 1991 to 2021). The largest volume of MCA aquifer withdrawing (about 23 BCM) was occurred during 2001 and 2011 (2.3 BCM yearly in average). Also, the comparison of the changes in the unit hydrograph of the MCA unit, show almost the same decreasing in the volume of the saturated part of the aquifer (40.5 BCM).

مهندسی عمران فردوسی،۳۷، ۴، ۱۴۰۳. (۱۸-۱)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

ارزیابی هندسه و بررسی تغییرات حجم اشباع و غیر اشباع آبخوان مشهد ـ چناران*

مقاله پژوهشی

حسین محمدزاده[۲،۱]   راهله شهریاری[۲]   ناصر حافظی مقدس[۳]   اعظم قزی[۴]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.87150.1287

چکیده *ارزیابی هندسه آبخوان برای تعیین ضخامت آبرفت، تخمین ذخیره آبخوان، پیش‌بینی آب زیرزمینی قابل استحصال و همچنین استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی و مدیریت بهتر آبخوان‌ها ضروری است. در این مقاله، هندسه و تغییرات حجم بخش‌های اشباع و غیراشباع این آبخوان مشهد ـــ چناران در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۴۰۰) مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت تعیین هندسه آبخوان، نقشه‌های پهنه‌بندی تراز سطوح مختلف (سطح آبخوان، ایستابی و سنگ کف آبخوان) تهیه و تغییرات ضخامت آبخوان و حجم آن برآورد شد. نتایج نشان داد، کاهش حجم بخش اشباع در بازه زمانی ۳۰ ساله، ۴۲۰ هزار میلیون مترمکعب است، که روند کاهشی هیدروگراف معرف آبخوان آن را تأیید می‌کند. بیشترین کاهش حجم بخش اشباع در دهه ۸۰ به دلیل برداشت زیاد از آبخوان صورت گرفته است، اما در دهه ۹۰ آبخوان وضعیت بهتری نشان می‌دهد. هر چند در نتیجه نفوذ پساب و فاضلاب شهری به آبخوان و همچنین انتقال آب از سد دوستی، در برخی نقاط کاهش جزئی در سرعت افت سطح ایستابی دیده می شود، اما به دلیل فشردگی و کاهش آبدهی ویژه مواد سفره، آبدهی آبخوان کاهش یافته است.*

واژه‌های کلیدی هندسه آبخوان، ضخامت آبرفت، حجم اشباع، مشهد - چناران.

Evaluation of The Geometry and Investigating of Changes in Saturated and Unsaturated Volumes of Mashhad - Chenaran Aquifer

Hossein Mohammadzadeh   Raheleh Shahriari   Naser Hafezi Moghaddas   Azam Ghazi

Abstract *The assessment of aquifer geometry is crucial to determine the thickness of the alluvium, to estimate the aquifer storage, to predict extractable groundwater, to optimize groundwater resource usage and to better manage aquifer. In this article, the geometry of the Mashhad – Chenaran aquifer and the changes in the volume of its saturated and unsaturated parts were investigated over a period of 30 years (1991-2021). To determine the geometry of the aquifer, digital zoning maps of different surfaces (including the aquifer surface, water table level, and bedrock surface) were prepared, and the aquifer thickness and the volume of the aquifer were estimated. According to the results, the volume reduction in the saturated part is about 42 BCMs over 30 years, as confirmed by decreasing trend of the aquifer unit-hydrograph. The maximum decrease in saturated volume accrued in the 2001 due to large withdrawals. However, in the 2011, the aquifer's condition was improved. Although there was a slight reduction in the water level drop rate in some parts of the aquifer due to the infiltration of urban effluents and sewage, as well as supplied from the Doosti dam, the aquifer yield decreased due to compaction, which in turn reduced the specific yield of the aquifer materials.*

Key words Aquifer Geometry, Alluvium Thickness, Saturated volume, Mashhad- Chenaran.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱۲/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۱۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استاد، گروه پژوهشی تحقیقات آب‌های زیرزمینی و ژئوترمال (متاب)، پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

Email: mohammadzadeh@um.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد آب‌های زیرزمینی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۳) استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۴) دکتری زمین‌شناس مهندسی، شرکت مهندسان مشاور زمین فیزیک پویا، مشهد.

مقدمه

آبخوان‌های آبرفتی یکی از منابع اصلی تأمین آب در اکثر نقاط دنیا است. از این رو، شناخت، ارزیابی و هندسه آبخوان، نه تنها برای شناسایی ضخامت آبرفت، برآورد ذخیره آبخوان، و پیش‌بینی آب‌های زیرزمینی قابل استحصال، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [1]، بلکه بررسی روند تغییرات هندسه و حجم (کل، اشباع و غیراشباع) آبخوان در طی زمان نیز در راستای استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی و مدیریت صحیح و ساماندهی به وضع موجود آبخوان‌ها، بسیار ضروری است. منابع آب زیرزمینی ذخایر استراتژیک ارزشمندی هستند که شکل‌گیری آنها طی سالیان طولانی صورت می‌پذیرد و باید برای آن برنامه‌ریزی بلندمدت انجام شود. امروزه برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، بیش از میزان آب تجدیدپذیر، نه‌تنها منجر به افت شدید سطح ایستابی آبخوان‌ها، که به نوبه خود منجر به کاهش آبدهی چاه‌ها، افزایش هزینه‌های پمپاژ و استحصال آب، کاهش کیفیت آب، خشک شدن تالاب‌ها، فرونشست زمین و دیگر اثرات منفی بر روی محیط زیست شده است [2,3]، بلکه نگرانی‌هایی را در مدیریت منابع آب زیرزمینی به وجود آورده است و آن را به یکی از چالش‌های مهم کشور تبدیل کرده است. بیلان آب کشور نیز نشان می‌دهد که مقدار تغذیه آب‌های زیرزمینی کمتر از حجم برداشت از آبخوان‌ها بوده و این امر باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های کشور به خصوص در آبخوان دشت مشهد ـ چناران شده است [4,5].

لذا بررسی روند تغییرات ذخایر آب زیرزمینی، معیاری ضروری برای مقایسه میزان باقی مانده منابع آب، توسعه پایدار و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی است [6]. آگاهی از روند تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و روند تغییرات هندسه و حجم آبخوان، سبب درک و شناخت بهتر مدیران از وضعیت کنونی و گذشته آبخوان به منظور مدیریت صحیح حال و آینده آن خواهد شد [7]. نظارت بر آب موجود باقی مانده در سفره زیرزمینی به درک کامل تاریخچه آن بستگی دارد تا مبنایی مناسب برای پیش‌بینی‌های آینده فراهم کند. به منظور اهداف مدیریتی آبخوان‌ها، مطالعاتی در دنیا [8,9,10,11] و ایران [12] در رابطه با تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی [13]، حجم مخزن و میزان بهره‌برداری از دشت‌ها صورت گرفته است. اما هدف از این مقاله، ارزیابی هندسه آبخوان مشهد ـ چناران، جهت شناسایی ضخامت آبرفت و برآورد حجم ذخیره آبخوان و همچنین بررسی تغییرات ضخامت و حجم بخش اشباع آبخوان در یک بازه زمانی ۳۰ ساله، جهت پیش‌بینی وضع آینده در قسمت‌های مختلف آبخوان است، که نوآوری این مقاله محسوب می‌گردد. همچنین در این مطالعه، مناطقی از آبخوان که افت سطح آب بیشتری را تجربه کرده‌اند و تشدید کننده بحران برای آینده هستند، شناسایی شده که همراه تغییرات برآورد حجم باقی مانده بخش اشباع آبخوان می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آینده آبخوان مفید باشد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز آبخوان دشت مشهد ـ چناران، با مساحت ۹۹۵۷ کیلومتر مربع و با موقعیت جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۷ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی، دارای سازندهای زمین‌شناسی متنوع (آذرین، دگرگونی، رسوبی کربناته ـ رسوبی غیرکربناته و آبرفت‌ها) است که بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار هستند [18]. دشت مشهد بخشی از پهنه فرونشست مشهد ـ قوچان است که در شمال شرق آن رشته‌کوه‌های کپه داغ و در جنوب غرب آن کوه‌های بینالود واقع شده است (شکل ۱ ـ الف). مرز شمال شرقی این فرونشست، گسل و رودخانه کشف رود و مرز جنوب غربی آن گسل جنوب مشهد است [14]. در اثر عملکرد گسل‌های مزبور و فرونشست دشت، ضخامت قابل توجهی از رسوبات آبرفتی در سطح آن انباشته شده و آبخوان گسترده‌ای را تشکیل داده است [15]. رسوبات آبرفتی دشت مشهد تحت تأثیر دو حوضه رسوب‌گذاری سازندهای سخت رسوبی (کپه داغ) و فیلیت‌های مشهد (بینالود) قرار دارد [16]. بخش زیادی از سطح دشت مشهد را رسوبات ژوراسیک و کرتاسه به خود اختصاص داده‌اند. واحدهای سنگی این دوران در ارتفاعات بینالود و در غرب شهر مشهد عمدتا آذرین و دگرگونی بوده و در بخش‌های شمالی و شرقی (حوضه رسوبی کپه داغ) سنگ‌های رسوبی است. گسل‌های شمال غرب ـ جنوب شرق منطقه (گسل شمال و جنوب مشهد، گسل شاندیز ـ سنگ بست)، به عنوان اصلی‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی، در جهت جریان آب زیرزمینی و گاهی بر کمیت و کیفیت آب آبخوان تأثیرگذار است. عامل اصلی کنترل‌کننده رفتار منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت مشهد پیچیده، متنوع و درک رفتار آن در بخش‌های مختلف

دشوار است. مهم‌ترین عوامل کنترل کننده هیدرولیک آبخوان دشت مشهد شامل ساختارهای زمین‌شناسی، موانع زیرزمینی، عارضه‌نگاری سنگ کف، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و منابع تغذیه کننده آبخوان می‌باشد [17].

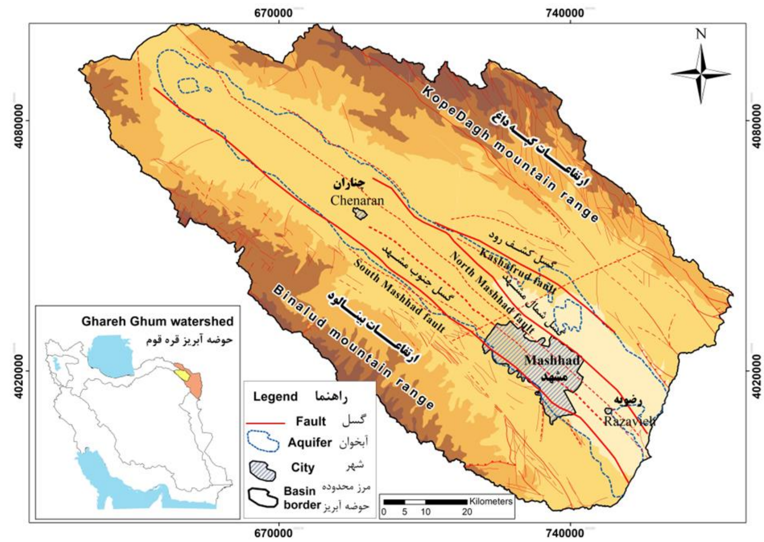
ریخت‌شناسی سطحی حوضه آبریز آبخوان دشت مشهد ـ چناران (شکل ۱ ـــ ب)، نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین ارتفاع حوضـــه آبریز، ۳۲۹۷ و ۸۵۸ متر از ســـطح دریا اســـت. ریخت‌شناسی و شکل ناهمواری‌های سطح زمین یکی از عوامل تعیین‌کننده هندســـه آبخوان هســـت که می‌توان آن را در غالب مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Map (DEM)) نشان داد که این نقشـــه رقومی رســـتری، حاوی تمامی اطلاعات ارتفاعی تمامی نقاط یک محدوده اســـت. نقشـــه پهنه‌بندی مدل رقومی ارتفاع ســـطح آبخوان مشـــهد، تهیه شـــده از روی نقشـــه‌های عارضه‌نگاری ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری [1]، نشان می‌دهد که ریخت‌شناسی سطح آبخوان مشهد ـــ چناران (شکل ۱ ـــ ج) حدود ۵۴۰ متر اختلاف ارتفاع دارد. قسمت شمال غربی چناران با ارتفاعی حدود ۱۴۰۰ متر از ســـطح دریا، مرتفع‌ترین بخش آبخوان و قسمت جنوب شرقی با ارتفاع ۸۶۰ متر از سطح دریا پست‌ترین بخش آبخوان را تشکیل می‌دهد. ریخت‌شناسی سنگ کف آبخوان بسیار ناهموار است به گونه‌ای که در برخی مناطق ســنگ کف نزدیک ســطح زمین بوده در برخی مناطق ضـخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر می‌رسد [19]. (جدول ۱) و (شکل ۱ ـ ب) منابع آب زیرزمینی دشت مشهد ـ چناران را نشان می‌دهد [20].

جدول ۱ منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی مشهد ـ چناران (۱۳۹۹- ۱۴۰۰)

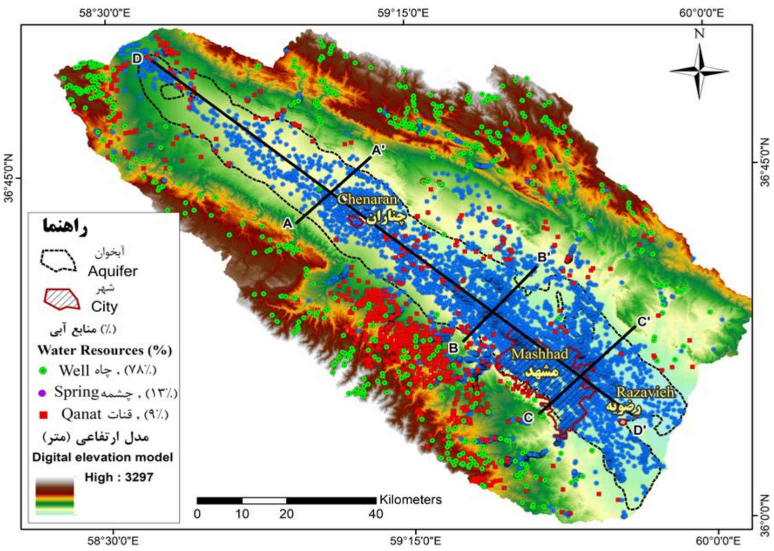
نوع منبع آبی	چاه	قنات	چشمه	جمع
تعداد	۵۷۹۷	۱۰۰۸	۶۶۸	۷۴۷۳
برداشت در سال	۶۰۲/۶	۵۹/۱	۳۳/۳	۶۹۵

*: اعداد تخلیه از منابع برحسب میلیون مترمکعب است.

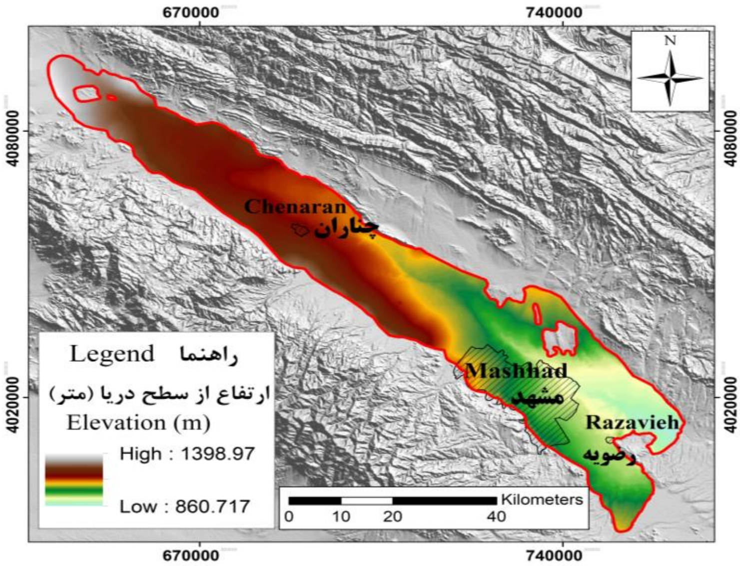
آبخوان مشهد ـ چناران، با وسعت حدود ۲۵۲۸ کیلومترمربع، مهم‌ترین آبخوان استان خراسان رضوی از لحاظ وسعت و میزان بهره‌برداری است [21]، که متأسفانه به علت برداشت زیاد در طی سالیان متمادی، گاهی با بیش از هزار میلیون مترمکعب برداشت سالانه [20]، با افت شدید سطح ایستابی روبه‌رو شده است. هر چند که اولین آگهی ممنوعیت دشت مشهد ـ چناران در سال ۱۳۴۸ ابلاغ شد، اما به دلیل روند رو به رشد حفاری چاه‌ها و بهره‌برداری از منابع آب موجود هیدروگراف معرف آبخوان مشهد روند نزولی سطح آب را نشان می‌دهد (شکل ۲). مجموع افت سطح آب زیرزمینی طی ۳۰ سال آمار حاصل از شبکه رفتارسنجی دشت مشهد ـ چناران، حدودا ۱۶/۲ متر و متوسط افت سالانه برابر ۰/۵۴ متر هست. همان طور که هیدروگراف نیز نشان می‌دهد بیشترین کاهش حجم آبخوان و کسری مخزن در سال‌های بین ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ به علت توسعه کشاورزی و افزایش سطوح زیر کشت رخ داده است.



(الف)

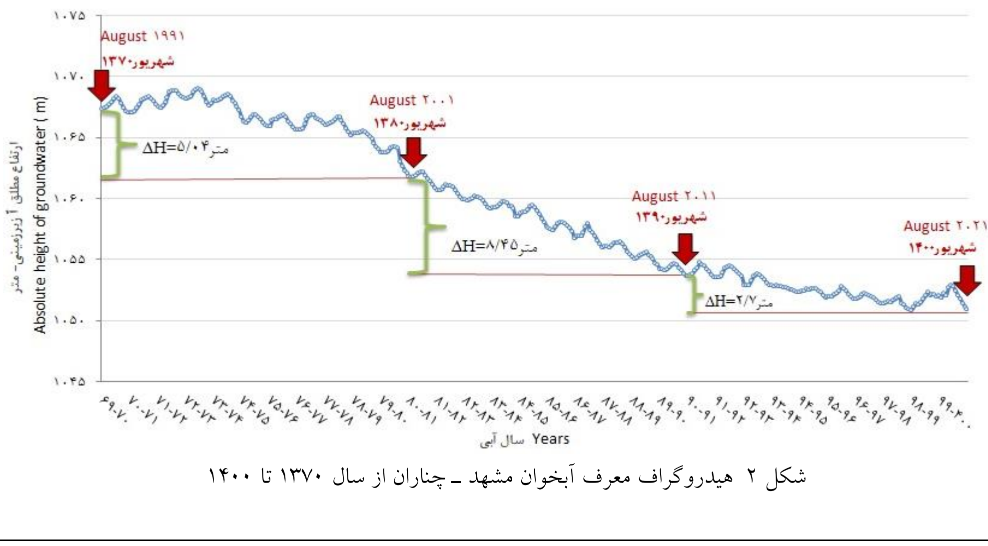


(ب)



(ج)

شکل ۱ الف) موقعیت حوضه آبریز مشهد ـ چناران، ب) ریخت‌شناسی و موقعیت منابع آب حوضه آبریز و ج) مدل رقومی ارتفاع (DEM) سطح آبخوان مشهد ـ چناران



شکل ۲ هیدروگراف معرف آبخوان مشهد ـ چناران از سال ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰

مواد و روش

به‌منظور تعیین هندسه آبخوان، نقشه‌های پهنه‌بندی سطوح مختلف آبخوان شامل نقشه رقومی ارتفاع سطح آبخوان (Ground Surface Digital Elevation Map (GDEM))، نقشه تراز سنگ کف یا نقشه رقومی ارتفاع سنگ کف آبخوان (Bedrock Digital Elevation Map (BDEM))، نقشه تراز ایستابی/ سطح آب زیرزمینی آبخوان (WDEM[4]) (مطابق 1) تهیه شد. سپس برای تعیین حجم (کل، اشباع و غیر اشباع) آبخوان، ابتدا نقشه‌های پهنه‌بندی (ضخامت آبخوان (ATM[5])، ضخامت اشباع آبخوان (STM[6]) و ضخامت غیر اشباع آبخوان (USTM[7])) تهیه و در نهایت با استفاده از سطح کل آبخوان مشهد (۲۵۲۸ کیلومترمربع)، و ضریب ذخیره محاسبه شده برای آبخوان (هنوز منتشر نشده است)، حجم بخش‌های مختلف آبخوان (کل، اشباع و غیر اشباع) محاسبه شد.

برای تهیه نقشه رقومی ارتفاع سنگ کف (BDEM) آبخوان، از اطلاعات زیرسطحی موجود شامل پروفیل‌های ژئوالکتریک [22] برداشت شده طی سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۹۹، چاه‌های تأمین آب شرب و کشاورزی و لاگ گمانه‌های اکتشافی استفاده شد. مطالعات ژئوالکتریک با هدف شناسایی آبخوان طی سال‌های متمادی در دشت مشهد صورت گرفته و محدوده آبخوان را به خوبی پوشش داده است. همچنین از اطلاعات لاگ گمانه‌ها و چاه‌های حفاری شده در سطح آبخوان مشهد (تعداد ۶۰۰۰ چاه بهره‌برداری کشاورزی و گمانه‌های اکتشافی) و از اطلاعات حفاری چاه بهره‌برداری تأمین آب شرب موجود در دشت مشهد، که ۴۵۳ حلقه چاه آن به سنگ کف برخورد کرده است [23]، برای تعیین عمق سنگ کف استفاده شد. با توجه به تمرکز چاه‌های عمیق حفر شده در مرکز آبخوان و پراکندگی نامتوازن در کل آبخوان، به روش زیر عمل شد. در مناطقی که چاه‌ها تا سنگ کف حفر شده‌اند، عمق چاه به عنوان ضخامت آبخوان و در سایر نقاط از نتایج تفسیر ژئوفیزیکی، حداقل ضخامت آبخوان محاسبه گردید و بر این اساس نقشه تراز سنگ کف (BDEM) با مرجعیت نقشه رقومی ارتفاعی سطح زمین (DEM) تهیه شد. در مرحله بعد از تفاضل بین نقشه رقومی سطح زمین و نقشه تراز سنگ کف و با استفاده از روش‌های درون‌یابی در (GIS[8]) نقشه پهنه‌بندی ضخامت آبرفت (ATM) تهیه و حجم کل آبخوان با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد.

(۱) حجم کل آبخوان $$(V_t) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(L_{sij} - L_{bij}\right) * a$$

که در آن V_t حجم کل آبخوان، L_{sij} (تراز سطح زمین در jامین ستون از iامین ردیف لایه (متر))، L_{bij} (تراز سنگ کف در jامین ستون از iامین ردیف لایه (متر)) است و a مساحت سلول (مترمربع) است.

برای تهیه حجم بخش اشباع آبخوان و بررسی تغییرات حجم آن در طی زمان، ابتدا داده‌های پایش کمی سطح آب زیرزمینی در ۷۴ پیزومتر موجود در گستره آبخوان مشهد ـ چناران، در بازه زمانی۳۰ ساله (هر ۱۰ سال (شهریور۱۳۷۰، شهریور۱۳۸۰، شهریور۱۳۹۰و شهریور۱۴۰۰)) جمع‌آوری و با استفاده از این داده‌ها، نقشه‌های رقومی تراز سطح ایستابی (WDEM) برای سال‌های۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰و ۱۴۰۰ تهیه شد. سپس با کم کردن نقشه رقومی ارتفاع سنگ کف (BDEM) آبخوان از نقشه‌های رقومی تراز سطح ایستابی (WDEM) طی سال‌های مختلف، با استفاده از قابلیت محاسباتی رستر9 در محیط GIS، نقشه پهنه‌بندی ضخامت اشباع برای هر یک از سال‌ها، تهیه و حجم بخش اشباع آبخوان با استفاده از رابطه (۲) به دست آمد.

(۲) حجم بخش اشباع آبخوان $$(V_S) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(L_{wij} - L_{bij}\right) * a$$

که در آن V_s حجم کل بخش اشباع آبخوان، L_{wij} (تراز آب زیرزمینی در jامین ستون از iامین ردیف لایه(متر)) و L_{bij} (تراز سنگ کف در jامین ستون از iامین ردیف لایه (متر)) و a مساحت سلول (مترمربع) است.

به روش مشابه با کم کردن نقشه‌های رقومی تراز سطح ایستابی (WDEM) از نقشه رقومی ارتفاعی سطح زمین (DEM)، نقشه پهنه‌بندی ضخامت غیر اشباع برای سال‌های مختلف تهیه و حجم بخش غیر اشباع آبخوان با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد. لازم به ذکر است که بنا به دلایلی مانند افت سطح آب زیرزمینی و خشک شدن، در تعداد شش چاه اکتشافی، پایش و رفتارسنجی آبخوان در سال ۱۴۰۰ صورت نگرفته است.

حجم بخش غیر اشباع آبخوان

$$(V_{US}) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(L_{sij} - L_{wij}\right) * a$$

(۳)

که V_{US} حجم کل بخش غیراشباع آبخوان، L_{wij} (تراز آب زیرزمینی در jامین ستون از iامین ردیف لایه(متر)) و L_{sij} (تراز سطح زمین در jامین ستون از iامین ردیف لایه (متر)) ا ست. a مساحت سلول (مترمربع) است.

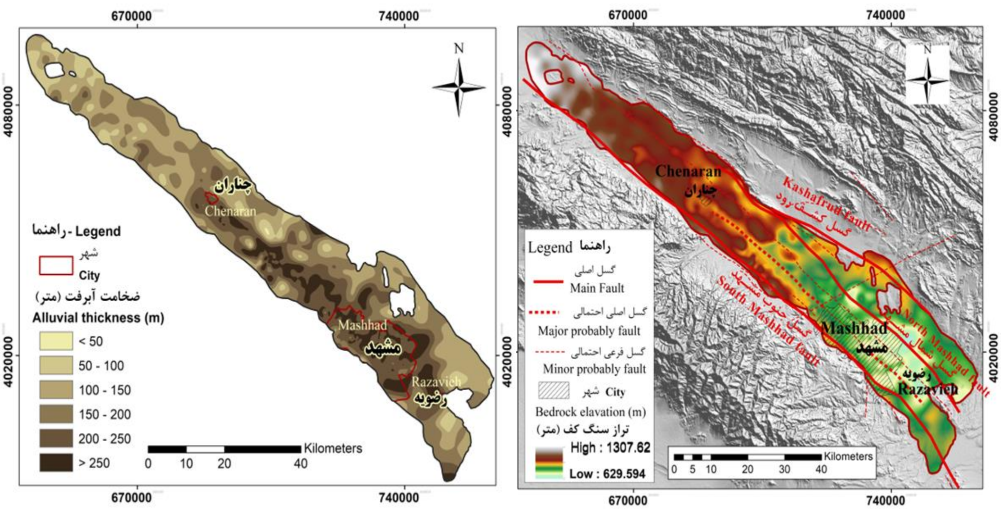
نتایج و بحث

در بررسی تغییرات حجم آب باید در مرحله اول هندسه آبخوان شناسایی می شد که بتوان در مراحل تغییرات حجم بخش اشباع آبخوان را محا سبه کرد. نتایج به د ست آمده در سه بخش ارائه شده است.

تغییرات ریخت‌شناسی تراز سنگ کف (BDEM) و ضخامت آبرفت آبخوان مشهد ـ چناران

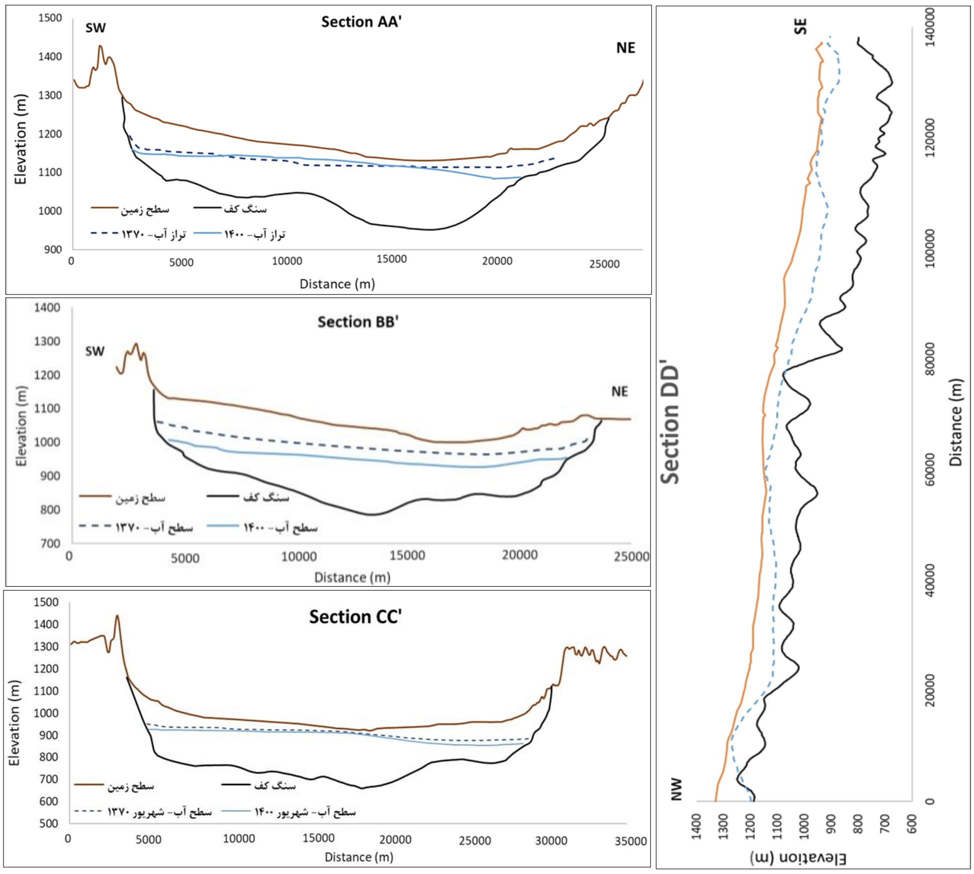
نقشه تراز سنگ کف به دست آمده (BDEM) و تغییرات ضخامت آبرفت آبخوان در (شکل ۳) نشان داده شده است. ریخت‌شناسی سنگ کف آبخوان بسیار ناهموار بوده و تابع عوامل مختلفی از جمله زمین‌شناسی و زمین‌ساخت هست. این ناهمواری‌ها عمدتا در مرکز دشت مشهد در فاصله بین مشهد تا چناران دیده می‌شود که می‌تواند متأثر از گسلش شمال و جنوب مشهد باشد. در برخی نقاط، سنگ بستر نزدیک سطح زمین و در برخی نقاط ضخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر می‌رسد. بررسی ضخامت آبرفت در آبخوان نشان می‌دهد بیشتر آبخوان مشهد ضخامتی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر دارد و ضخامت آبرفت در دو سمت شمال شرق و جنوب غرب با نزدیک شدن به واحدهای سنگی ارتفاعات کپه داغ و بینالود کاسته می‌شود. قسمت عمیق آبخوان مشهد در قسمت مرکزی دشت و در فاصله بین چناران و رضویه (که شهر مشهد نیز بر روی همین قسمت عمیق آبخوان قرار دارد) واقع شده است و بیشتر چاه‌های عمیق تأمین آب شرب شهر مشهد نیز در این ناحیه متمرکزند و برداشت از آبخوان بیشتر در این نواحی صورت می‌گیرد. این مسئله می‌تواند متأثر از گسل‌های موجود در جنوب دشت مشهد باشد که باعث فرونشست بیشتر دشت و افزایش ضخامت آبرفت شده است.

تغییرات ضخامت آبرفت آبخوان، در مقطع طولی و چند مقطع عرضی در شکل (۴) دقیق‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. سطح آب زیرزمینی در مقطع AA' واقع در فاصله بین چناران تا ابتدای آبخوان و با ضخامت میانگین آبرفت ۱۵۰ متر در فاصله کمتری از سطح زمین است و در مقایسه تراز آب بین سال ۱۳۷۰ و ۱۴۰۰ افت کمتری را نشان می‌دهد؛ اما سطح آب زیرزمینی (آخرین آمار موجود) در مقطع BB' واقع در قسمت مرکزی آبخوان با ضخامت بین ۳۰۰–۲۰۰ متر، در عمق بیشتری واقع شده است و به علت برداشت‌های بیشتر در این قسمت بیشترین افت سطح آب ۳۰ ساله در این منطقه دیده می‌شود. قسمت مرکزی آبخوان، با توجه به گسترش و کشیدگی شهر مشهد به سمت مرکز آبخوان و قرار داشتن صنعت و کشاورزی شهر مشهد در این قسمت، به علت وجود چاه‌های بیشتر و اضافه برداشت در این منطقه بحرانی‌ترین بخش آبخوان به نظر می‌رسد. در مقطع CC' که از مرکز شهر مشهد عبور و در قسمت عمیق آبخوان واقع شده است، سطح آب زیرزمینی درست است که به طور کلی نسب به سال ۱۳۷۰ افت کمی نشان می‌دهد اما در مقایسه ده ساله سطح آب در سال ۱۴۰۰ در مقایسه با سال ۱۳۹۰ (شکل ۷) در برخی قسمت‌ها نسبت به اطراف کمی بالاآمدگی نشان می‌دهد که همان طور که در مطالعات قبلی بیان شده، دلیل آن می‌تواند نفوذ پساب‌ها و فاضلاب شهری و یا آب انتقالی از سد دوستی باشد [24,25].



(ب) (الف)

شکل ۳ الف) نقشه تراز سنگ کف (BDEM) و ب) نقشه ضخامت آبخوان مشهد ـ چناران



شکل ۴ تغییرات ارتفاع سطح زمین، سطح ایستابی و سنگ‌بستر آبخوان مشهد ـ چناران در مقطع طولی و سه مقطع عرضی (سال ۱۳۷۰ و ۱۴۰۰) (راستای مقاطع در شکل ۱ ـ ب نشان داده شده است)

مقطع DD' که بیانگر ابتدا تا انتهای آبخوان است، تغییرات سطح آب زیرزمینی و ناهمواری سنگ کف در مقطع طولی آبخوان را به خوبی نشان می‌دهد به طوری که بالاآمدگی و افت سطح آب زیرزمینی نسبت به سنگ کف در سراسر آبخوان مشخص است (نمایش تغییرات شدیدتر سنگ بستر در مقطع طولی DD' نسبت به مقاطع عرضی AA'، BB' و CC'، به دلیل اختلاف در مقیاس افقی هست). بررسی مقاطع ضخامت آبرفت و ضخامت اشباع آبخوان نشان می‌دهد که آبخوان آبرفتی مشهد از نوع آزاد و به صورت تک لایه است و جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان از غرب و شمال غرب به سمت شرق و جنوب شرق است و تأییدی بر مطالعات گذشته می‌باشد [26,27].

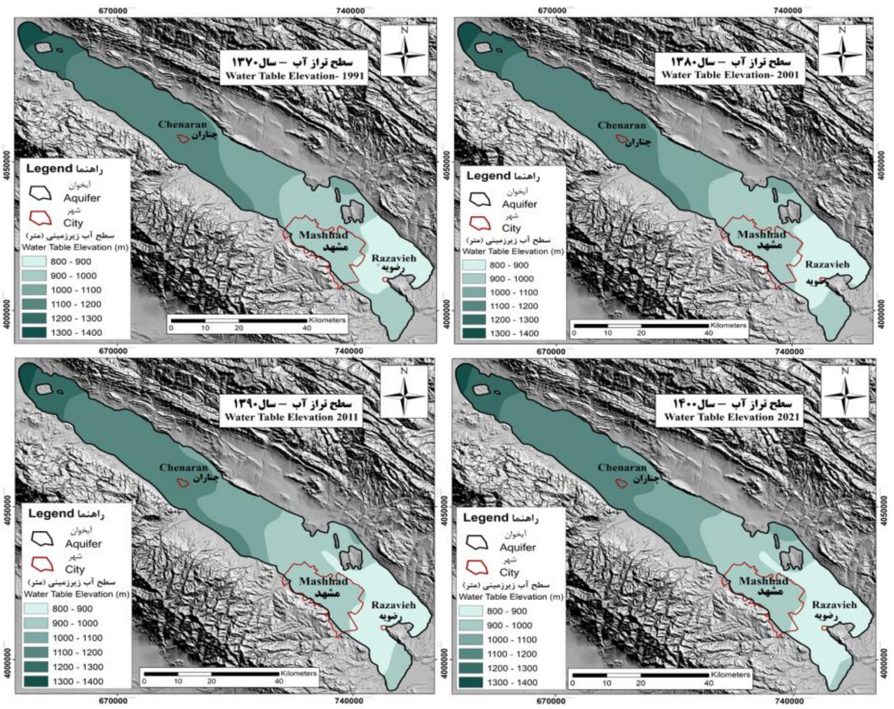
تغییرات تراز سطح ایستابی مشهد ـ چناران در طی ۳۰ سال گذشته (۱۳۷۰ ـ ۱۴۰۰)

نقشه‌های پهنه‌بندی تراز سطح ایستابی (WDEM) تهیه شده برای آبخوان مشهد ـ چناران (شکل ۵) نشان می‌دهد، در ابتدای آبخوان و در قسمت شمال غربی آبخوان، آب در سطح تراز بالاتری نسبت به انتهای آن قرار دارد و جهت جریان آب از ابتدای آبخوان (شمال غربی) به سمت انتهای آن (جنوب شرقی) است. تراز آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ در قسمت مرکزی آبخوان تغییرات بیشتری را تجربه کرده است که با توجه به اینکه بیشترین تخلیه و چاه‌های بهره‌برداری از سطح آبخوان در این منطقه قرار دارند، پدیده‌ای دور از انتظار نیست. شکل مقطع BB (شکل ۴) هم تأییدی بر این مطلب می‌باشد.

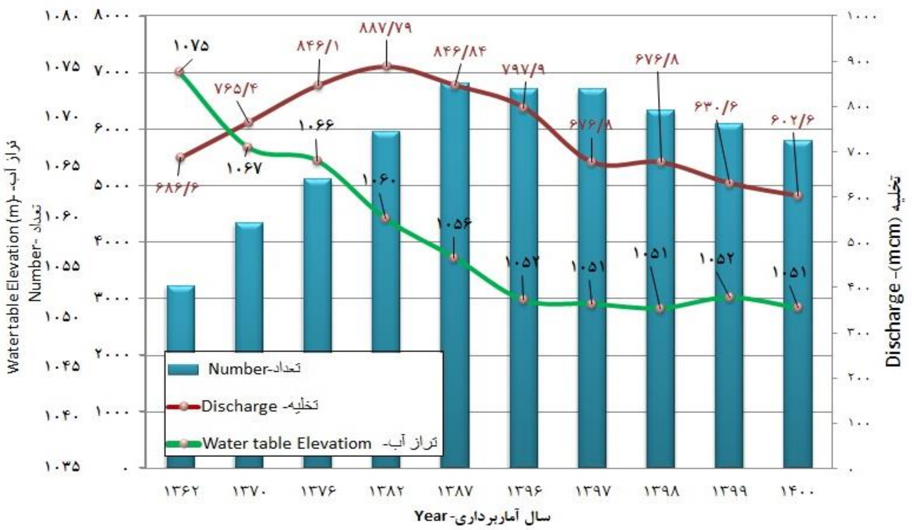
بررسی آمارهای بهره‌برداری از منابع آبی آبخوان مشهد و مقایسه آن با افت سطح آب زیرزمینی (شکل ۶) نیز نشان می‌دهد که بیشترین بهره‌برداری از ذخایر زیرزمینی آبخوان مشهد ـ چناران در بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ صورت گرفته است. که به دلیل نگرش ویژه کشور به توسعه کشاورزی به‌منظور تأمین نیاز غذایی جمعیت رو به ازدیاد بوده است [28] که در نتیجه آن که با کاهش زیاد حجم بخش اشباع آبخوان نیز

منطبق است. حجم بالای تخلیه آب در سال ۱۳۸۲ در مقایسه با ۱۳۸۷، علی رغم افزایش تعداد چاه‌های بهره‌برداری در سال ۱۳۸۷، به دلیل در نظر نگرفتن تعداد قابل توجهی از چاه‌ها در آمار سال ۱۳۸۲ بوده است. که افزایش آمار تعداد چاه‌ها از سال ۱۳۸۷ به بعد ناشی از تصویب قانون تعیین تکلیف چاه‌های غیر مجاز و صدور پروانه بهره‌برداری برای آن‌ها است[20]. آمارهای ۵ سال منتهی به سال ۱۴۰۰ نیز نشان می‌دهد تعداد چاه‌های غیر مجاز در سطح دشت مشهد از ۲۵۲۵ حلقه چاه در سال ۱۳۹۶ به تعداد ۱۷۲۸ حلقه در سال ۱۴۰۰ رسیده است.

میزان تخلیه و بهره‌برداری از آبخوان مشهد روند کاهشی داشته است (شکل ۶)، که به دلیل کاهش دبی و بازدهی چاه‌ها است. این مسئله می‌تواند به آن معنی باشد که منابع آب زیرزمینی آبخوان به خاطر فشردگی مواد سفره و کاهش حجم مفید آبخوان با کاهش آبدهی مواجه شده‌اند، هر چند که طرح‌های تعادل بخشی آبخوان به میزان جزئی منجر به کاهش سرعت افت سطح ایستابی شده باشند.



شکل ۵ نقشه‌های پهنه‌بندی تراز سطح ایستابی (WDEM) آبخوان مشهد ـ چناران برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰، ۱۴۰۰



شکل ۶ روند بهره‌برداری در مقابل افزایش تعداد چاه‌های بهره‌برداری و کاهش تراز سطح ایستابی آبخوان مشهد ـ چناران

تغییرات ضخامت اشباع و غیر اشباع آبخوان

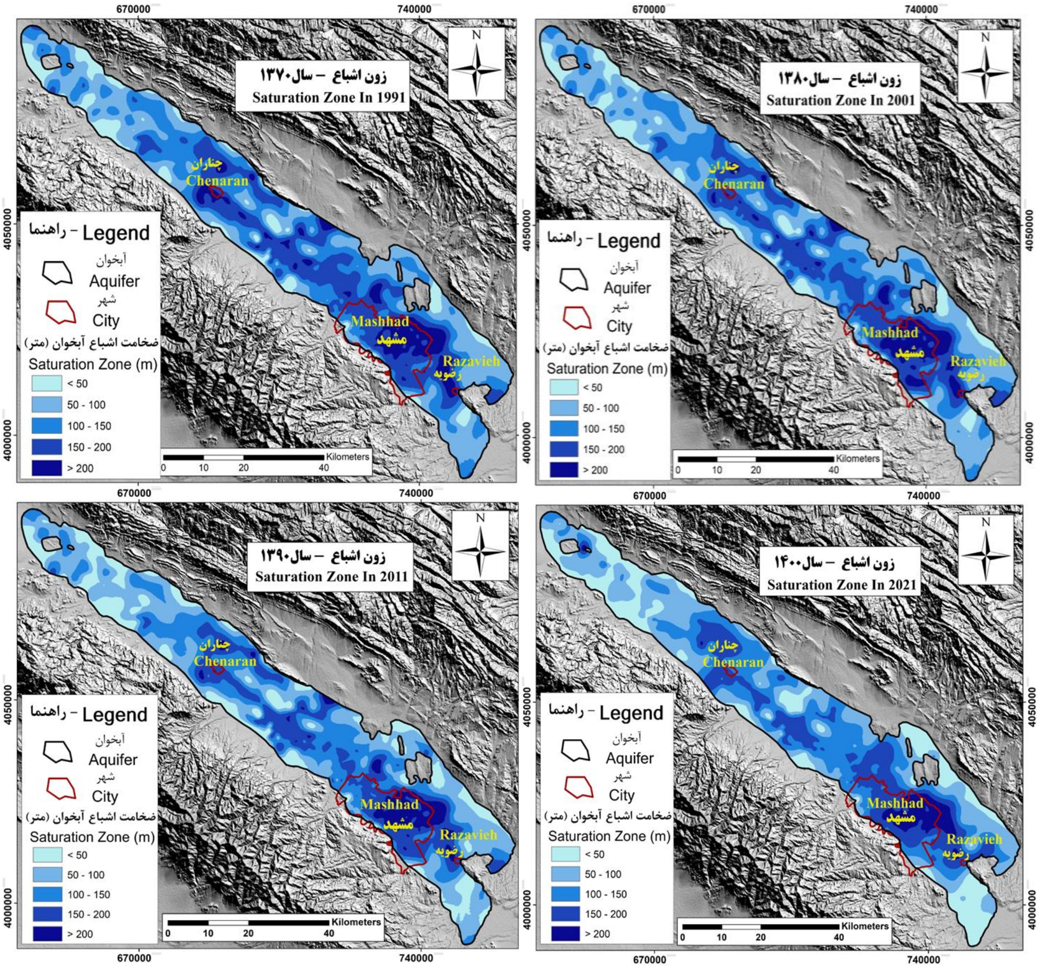
با در اختیار داشـــتن نقشـــه‌های پهنه‌بندی تراز ســـنگ کف (BDEM) و پهنه‌بندی تراز سطح ایستابی (WDEM)، نقشه‌های پهنه‌بندی ضـخامت اشـباع آبخوان مشـهد در سـال‌های (۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰) تهیه شـد (شـکل ۷). بررسـی تغییرات ضخامت و حجم ا شباع و غیر ا شباع (جدول ۲)، نشان می‌دهد که ضخامت و حجم بخش اشباع آبخوان طبق انتظار در طی این سال‌ها روند کاهشی دا شته ا ست. به طوری که با افت تراز آب زیرزمینی در سـطح آبخوان، حجم بخش اشـباع آبخوان در طی ۳۰ ســال، حدود ۴۲ میلیارد متر مکعب کاهش داشــته اســت. بیشـترین کاهش ضـخامت اشـباع در اندازه‌گیری‌های صـورت گرفته بین شهریور ۱۳۸۰ تا شهریور ۱۳۹۰، به میزان ۲۳ میلیارد مترمکعب بوده اســت که در طی این ســال‌ها چاه‌ها و میزان بهره‌برداری از آبخوان بیشــتر بوده اســت. از آنجایی که آبخوان شـکل هندسـی منظم ندارد و به صـورت یک اسـتوانه نیسـت؛ بدیهی است که تغییرات ضخامت غیر اشباع با تغییرات ضخامت ا شباع برابر نیست. اما کاهش حجم بخش ا شباع برابر با افزایش بخش غیر اشـباع اسـت و دلیل این افزایش برداشـت‌ها توسـعه کشاورزی و افزایش سطح زیر کشت در طی این سال‌ها بنا به دلایلی که در بالا عنوان شد می‌باشد.

در مقایسه حجم قسمت اشباع آبخوان در دو دهه ۸۰ و ۹۰، از ســال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ آبخوان در وضــعیت بهتری نســبت به گذشــته قرار داشــته اســت و حجم کمتری آب (حدود ۵۰۰۰ میلیون مترمکعب) از دست داده است. یکی از دلایل آن می‌تواند توجه بیشتر به مسئله حفاظت و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی با رویکرد توسعه پایدار در برنامه پنجم توسعه کشور (۱۳۹۰ – ۱۳۹۴) و همچنین تصـــویـب قـانون اجرای طرح احیـا و تعادل‌بخشـی منابع آب زیرزمینی کشــور با هدف متعادل کردن میزان برداشت آب در سال ۱۳۹۳ باشد. اما علی رغم تلاش‌های وزارت نیرو طی ۵ ســال اخیر در چارچوب طرح احیا و تعادل بخشی، روند تراز آب‌های زیرزمینی همچنان نزولی است [29]. که ممکن اســت آبخوان با کاهش بازدهی مواجه شــده باشــد. کاهش شـیب نمودار افت تراز سـطح ایسـتابی اگر چه می‌تواند گویای نزدیک شدن به شرایط تعادل آبخوان (برابری بردا شت خالص با تغذیه خالص) باشد، اما با افت تراز سطح ایستابی، به تدریج توان برداشـــت از آبخوان نیز کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر نمی‌توان از آبخوانی که دچار افت مستمر و برگشت‌ناپذیر شده است مانند قبل آب بردا شت نمود. بنابراین با عدم اجرای برنامه تعادل بخشـــی نیز بعد از مدتی کاهش شـــیب افت تراز آبخوان را خواهیم داشت. افزایش افت سطح ایستابی در آبخوان با وجود کنترل برداشـــت‌های غیر مجاز، نشـــان از کاهش توان برداشت چاه‌های بهره‌برداری مجاز است.

جدول ۲ تغییرات حجم (کل، اشباع و غیراشباع) آبخوان مشهد ـ چناران در طی ۳۰ سال

		شهریور ۱۳۷۰ August 1991	شهریور ۱۳۸۰ August 2001	شهریور ۱۳۹۰ August 2011	شهریور ۱۴۰۰ August 2021
بخش غیراشباع Un satutarion Zone	متوسط ضخامت (متر) Medium thickness (m)	۴۹	۵۵	۶۲	۶۵
	حجم Volume (هزار میلیون مترمکعب)	۱۲۳	۱۳۷	۱۶۰	۱۶۵
بخش اشباع Saturation Zone	متوسط ضخامت (متر) Medium thickness (m)	۱۲۲	۱۱۶	۱۰۷	۱۰۵
	حجم Volume ((هزار میلیون مترمکعب)	۳۰۷	۲۹۳	۲۷۰	۲۶۵
*کل آبخوان Aquifer	متوسط ضخامت (متر) Medium thickness (m)	۱۷۲			
	حجم Volume (هزار میلیون مترمکعب)	۴۳۰			

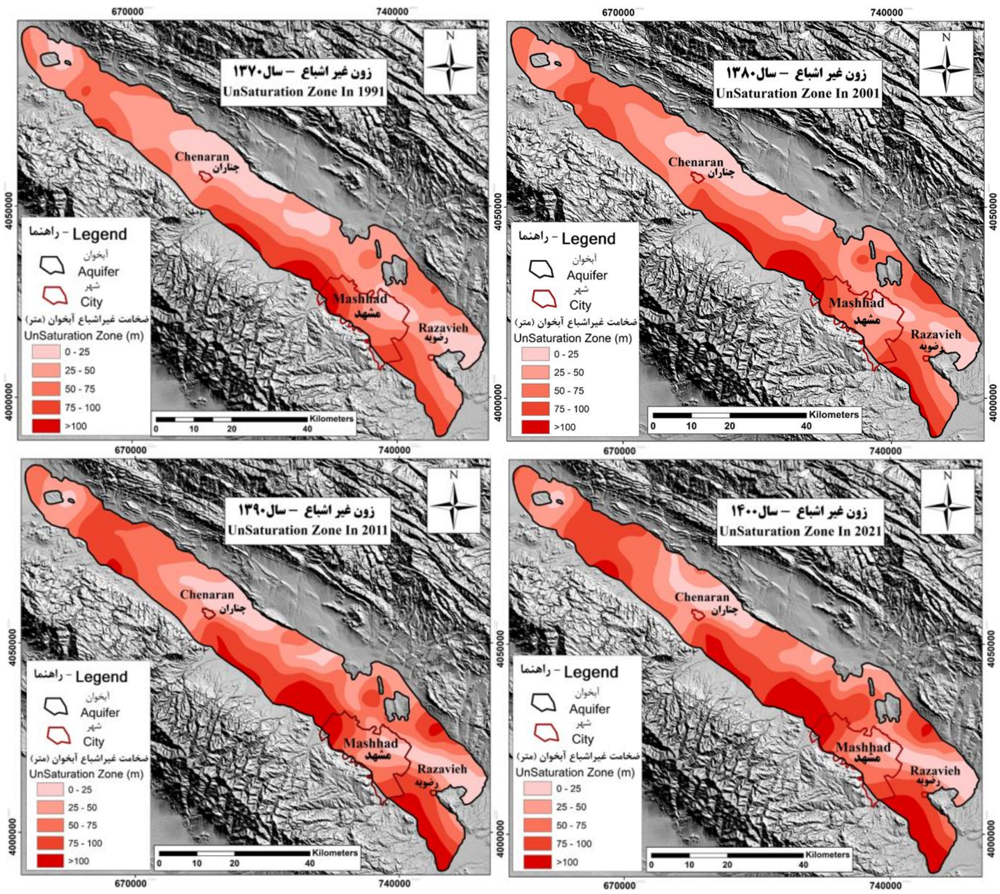
*: ضخامت کل آبخوان ثابت در نظر گرفته شده است و بنابراین حجم محاسبه شده ثابت است. اما با توجه به اینکه آبخوان مشهد در دهه‌های گذشته دچار فرونشست شده است، می‌توان تغییرات حجم را با توجه به میزان نشست در هر سال محاسبه کرد، که نیاز به بررسی و مطالعه بیشتری دارد.



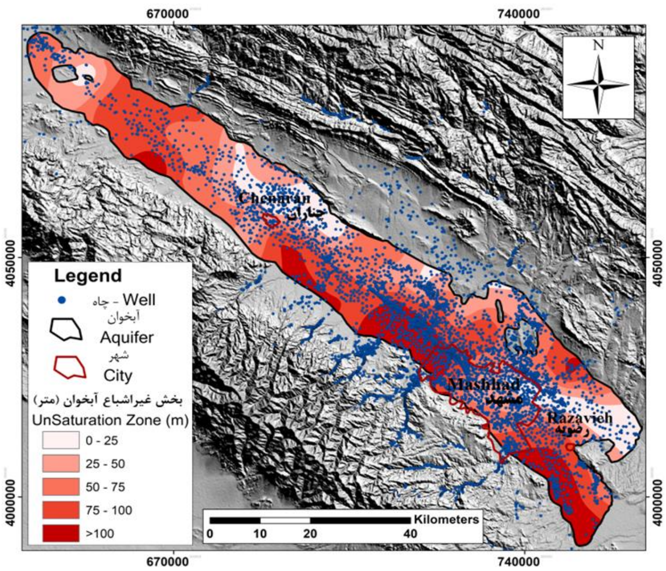
شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی تغییرات ضخامت اشباع آبخوان مشهد ـ چناران برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰، ۱۴۰۰

بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی ضخامت اشباع نشان از بالاآمدگی سطح آب در هسته مرکزی آبخوان در فاصله بین رضویه و تا مشهد در بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ است. داده‌های اندازه‌گیری شده در پیزومترهای آبخوان نشان می‌دهد با توجه به اینکه بقیه قسمت‌های آبخوان در طی این سال‌ها افت را تجربه کرده‌اند، بخش عمیق آبخوان در بعضی قسمت‌ها نسبت به سال ۱۳۹۰ دچار افزایش ضخامت شده، که دلیل آن می‌تواند نفوذ پساب و فاضلاب شهری به آبخوان و یا بستن تعدادی از چاه‌ها به خاطر انتقال آب از سد دوستی باشد [24,25]

پایین رفتن تراز آب زیرزمینی و افت سطح آب در آبخوان و در پی آن گسترش قسمت غیر اشباع آن، پیامدهای منفی و مشکلات زیادی از جمله کاهش بازدهی چاه ها، افزایش هزینه های اقتصادی جهت کف‌شکنی و حفاری مجدد و همچنین افزایش هزینه‌های پمپاژ از اعماق بیشتر، کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی، و تراکم بخش غیر اشباع آبخوان (نشست) در رسوبات تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته آبرفتی، که سبب آسیب به سازه‌ها، تأسیسات و خطوط انتقال گاز و نفت در دشت‌ها می‌شود، را در پی دارد. بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی ضخامت غیر اشباع آبخوان مشهد ـــ چناران (شکل ۸ و جدول ۲) نشان از گسترش بخش غیر اشباع آبخوان مشهد ـ چناران در طی ۳۰ سال گذشته را دارد، به طوری که این گسترش بر تمرکز چاه‌های موجود در سطح آبخوان نیز منطبق است. حجم زیاد برداشت‌ها در مقابل عدم تغذیه در این بخش‌ها، افت سطح آب زیرزمینی و افزایش ضخامت بخش غیر اشباع را شدت بخشیده است (شکل ۹).



شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی تغییرات ضخامت غیر اشباع در آبخوان مشهد ـ چناران برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰، ۱۴۰۰



شکل ۹ تطابق محل تمرکز چاه‌های بهره‌برداری با محل افزایش ضخامت بخش غیر اشباع در سال ۱۴۰۰

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی روند تغییرات هندسه و حجم آبخوان آبرفتی مشهد در سه دهه گذشته، نشان می‌دهد که حجم کل آبخوان مشهد ـ چناران حدود ۴۳۰ میلیارد مترمکعب است و با گذشت زمان، ضخامت بخش اشباع کاهش یافته است. تغییرات حجم بخش اشباع آبخوان مشهد ـ چناران در طی بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۳۷۰–

۱۴۰۰) از ۳۰۷ میلیارد مترمکعب به ۲۶۵ میلیارد مترمکعب رسیده است که حدود ۴۲ هزار میلیون مترمکعب کاهش را نشان می‌دهد. بیشترین تخلیه آبخوان در طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ (با توجه به بهره‌برداری بیشتر از منابع آب زیرزمینی در طی این سال‌ها) به میزان ۲۳ میلیارد مترمکعب صورت گرفته است، به طور متوسط در این بازه زمانی، آبخوان هر سال ۲/۳ میلیارد مترمکعب کاهش حجم داشته است. همچنین بررسی و مقایسه روند تغییرات کاهشی هیدروگراف معرف آبخوان مشهد ـ چناران، نیز نشان می‌دهد که حدود ۴۰/۵ میلیارد مترمکعب حجم بخش اشباع آبخوان کاهش یافته است که با داده‌های به دست آمده تطابق دارد. مقایسه حجم قسمت اشباع آبخوان در دو دهه ۸۰ و ۹۰ نشان می‌دهد، از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ آبخوان در وضعیت بهتری نسبت به سال‌های قبل قرار داشته است و حجم کمتری آب (حدود ۵۰۰۰ میلیون مترمکعب) از دست داده است. هر چند به طور قطع نمی‌توان گفت تأثیر مثبت طرح‌های تعادل‌بخشی آبخوان باشد، بلکه ممکن است در نتیجه کاهش بازدهی آبخوان باشد. با تعیین دقیق ضریب آبدهی ویژه در پهنه آبخوان و اعمال آن در حجم بخش اشباع می‌توان تغییرات حجم ذخیره آب موجود آبخوان از گذشته تا کنون را بررسی نمود که در برنامه‌ریزی و مدیریت آبخوان اهمیت دارد.

سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی و از شرکت آب و فاضلاب مشهد، به خاطر در اختیار گذاردن اطلاعات و داده‌های موردنیاز سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

[1] H. Mohammdzadeh, R. Shahriari, N. Hafezi moghaddas, A. Ghazi*I*, “nvestigating the geometry of Mashhad alluvial aquifer based on subsurface studies,” *Paper presented at the 7th Symposium of Sedimentological Society of Iran, Iran- Isfahan*. [Online].Available: https://www.en.symposia.ir/SGSI07[Accessed Augst.5, 2022].

[2] E. K. White, T. J. Peterson, J. Costelloe, A. W .Western, E. Carrara, “Can we manage groundwater? A method to determine the quantitative testability of groundwater management plans,” *Water Resources Research*, vol. 52, no. 6, pp. 4863-4882, 2016. Available: doi.org/10.1002/2015WR018474

[3] E. V. De Souza, M. A. C. da Silva, “Management system for improving the efficiency of use water systems water supply,” *Procedia Engineering*, vol. 70, pp. 458-466, 2014. Available: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.051

[4] Z. Kayhomayoon, F. Babaeian, S., Ghordoyee Milan, N. Arya Azar, R. Berndtsson, “A Combination of Metaheuristic Optimization Algorithms and Machine Learning Methods Improves the Prediction of Groundwater Level,” *Water*, vo1.4, no. 5, p. 751, 2022. Available: https://doi.org/10.3390/w14050751

[5] F. Salehi Moteahad, N. Hafezi Moghaddas, Gh. Lashkaripour, M. Dehghani, “Geological parameters affected land subsidence in Mashhad plain, north-east of Iran,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 78, no. 14, pp. 1-12, 2019. Available: doi.org/10.1007/s12665-019-8413-y

[6] A. M. Cheraghi, B. Nagafi, S. Shajari, M. Javan, “The Trend of Changes in Groundwater Quantity and Quality in the Sarvestan Plain of Fars Province,” *Watershed Management Research*, vol. 33, no. 2, pp. 82-96, 2020. [abstract]. Available: https://doi.org/10.22092/wmej.2019.128069.1283

[7] K. Roushangar, V. Nourani, M. Dolatshahi, “Investigation and trend identification of groundwater level variations using discrete wavelet transform and non parametric tests (case study: Azarshahr plain),” *Iran-Water Resources Research*, vol. 16, no. 1, pp. 102-115, 2020. [abstract]. Available: 20.1001.1.17352347.1399.16.1.8.2

[8] J. J. Butler, R. L. Stotler, D. O. Whittemore, E. C. Reboulet, “Interpretation of water-level changes in the High Plains

Aquifer in western Kansas," *GroundWater*, vol. 51, no. 2, pp. 180–190, 2013. Available: https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00988x

[9] E. M. K. Haacker, A. D. Kendall, D. W. Hyndman, "Water level declines in the High Plains Aquifer: *Predevelopment to resource senescence*," *Groundwater*, vol. 54, no. 2, pp. 231-242, 2016. Available: https://doi.org/10.1111/gwat.12350.

[10] D. M. Ciruzzi, C. S. Lowry, C, "Impact of complex aquifer geometry on groundwater storage in high-elevation meadows of the Sierra Nevada Mountains, CA," *Hydrological Processes*, vol. 31, no. 10, pp. 1863-1875, 2017. Available: https://doi.org/10.1002/hyp.11147

[11] M. Hamdi, M. F. Zagrarni, N. Djamai, H. Jerbi, K. Goita, J. Tarhouni, "3D geological modeling for complex aquifer system conception and groundwater storage assessment: Case of Sisseb El Alem Nadhour Saouaf basin, northeastern Tunisia," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 143, pp. 178-186, 2018. Available: https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.017

[12] N. Zinati, A. Esmaeily, "Calculating of the alluvial aquifer volume at Kerman plain using geographic information systems *(GIS)*," Paper presented at the The First International Conference onb Plant, Water, Soil & Weather Modeling, International Center for Science, High Technology & Environmental Sciences Shahid Bahonar University of Kerman .(In Persian) (2010).

[13] E. Fijani, S. Meysami, M. Mozafari, "Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 1-18, 2022. [abstract]. Available: https://doi.org/ 10.22067/JFCEI.2022.77818.1169

[14] M. Berberian, M. Qorashi, M , J. Shoja-Taheri, M. Talebian, M, "Seismotectonics and Earthquake-Fault Hazard Investigations in the Mashhad-Neyshabur Quadrangle Area (Contribution to the Seismotectonics of Iran, part VIII; 233p. In First (Ed), Vol. 72, 2000.

[15] N. Hafezi Moghaddas, C. Leo, B. Rahimi, B., A. Azadi, "Morpho-tectonics and Geoelectrical method applied to active faults characterization in South of Mashhad Plain Northeast of Iran," *Geopersia*, vol. 8, no. 1, pp. 13-26, 2018. Available: https://doi.org/10.22059/GEOPE.2017.230489.648312

[16] A. Kangi, A, M. R. Arjmand, 'The Role of Chahshak Fault on Quality of Drinking Water Wells Northwest of Mashhad Plain," *Iranian Journal of Environmental Geology*, vol. 12, no. 45, pp. 29-37, 2019. [abstract]. Available: https://www.magiran.com/p2063718

[17] M. R, Arjmand, A. Kangi, N. HafeziMoghaddas, "The effect of Tous fault on groundwater resources in northern parts of Mashhad plain," *Iranian Journal of Earth Sciences*, vol. 11, no. 3, pp. 205-214, 2019. Available: https://doi.org/10.30495/ijes.2019.667380

[18] H. Mohammadzadeh, J. Hussainzaheh, S. Samani, "Evaluation of characteristics and hydrogeochemical evolution of Mashhad-Chenaran aquifer by inverse geochemical modeling in Phreeqc," *Iranian Journal of Soil and Water Research*, vol. 53, no. 4, pp. 777-793, 2022. [abstract]. Available: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339569.669218.

[19] Water Resources Basic Studies Office, *Prohibition Extension Report of Mashhad-Chenaran study area waterresources*, Khorasan Razavi Regional Water Company, 2018. (In Persian)

[20] Water Resources Basic Studies Office, *Water status of the study area of Mashhad Report*, Khorasan Razavi Regional Water Company, . 2022. (In Persian).

[21] M. Arjmand Sharif, H. Jafari, "Estimation of Groundwater Recharge Lag Time in Mashhad-Chenaran Aquifer Using Cross-Correlation Method," *Journal of Water and Soil*, vol. 35, no. 4, pp. 489-504, 2021. [abstract.]. Available: https://doi.org/10.22067/jsw.2021.70672.1058

[22] N. Hafezi moghaddas, A. Azadi, "Mashhad plain geophysical studies final report," *Geological Survey and Mineral Exploration of Iran*, 2015. (In Persian)

[23] M. Harami, A. Mahbobi, M. Khanebad, Final report "The feasibility of locating and drilling wells for drinking water in order to exploit deep aquifers in the northwest of Mashhad watershed. Ferdowsi University of Mashhad," *Mashhad Water and Waste Water Company*, 2019. (In Persian)

[24] H. Shamszadeh, R. Barati, A. Noshahri., M. Fakhari, "Study of Groundwater Response to Water Transfer from Outside Basin (Case Study: Water Transfer from Doosti Dam to Holy City of Mashhad), *Journal Aquifer and Qanat*, vol. 3, no. 4, pp. 41-52, 2022. Available: https://doi.org/10.22077/jaaq.2018.1553.1005

[25] V. Nickpeyman, H. Mohammadzadeh, "Investigating of water level rising In Mashhad due to water transfer from Doosti Dam," *Paper presented at the 8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment papers*, 2013.

[26] Gh. Lashkaripour, M Ghafori, Z. Soveyzi, Z. Peyvandi, *The drop of underground water level and land subsidence in Mashhad plain. Paper presented at the 9th Symposium of Geological Society of Iran, Tehran, 2005. (In Persian).*

[27] M. Akbari, M. R. Jarge, H. Madani Sadat, "Assessment of decreasing of groundwater-table using geographic information system (GIS)(case study: Mashhad plain aquifer)," *Journal of water and soil conservation*, vol. 16, no. 4, pp. 63-78, 2009. [abstract]. Available: 20.1001.1.23222069.1388.16.4.4.0

[28] H. Afrakhteh, M. Hajipour, M. Gourzin, B. Nejati, "The situation of sustainable agricultural development in Iran development plans case: Five-year plans after the revolution," *Quarterly Journal of the Macro and Strategic Policies*, vol. 1, no. 1, pp. 43-62, 2013. Available: https://www.magiran.com/p1180025

[29] S. Samani, "Providing Sustainable Global Groundwater Resources Management Models to Improve the Sustainability Plan in Iran," *Iran-Water Resources Research*, vol. 16, no. 2, pp. 271-291, 2020. [abstract]. Available: 20.1001.1.17352347.1399.16.2.19.5